

VALIDATION OF A SIMPLIFIED QUASI-STATIC ELASTOPLASTIC CHARACTERIZATION METHODOLOGY OF THERMOPLASTIC INJECTION MATERIALS IN THE INDUSTRIAL PROCESS FOR STRUCTURAL SIMULATION

Puigoriol Forcada, Josep Maria; López Navarro, Ferran; Reyes Pozo, Guillermo

IQS School of Engineering, URL

A characterization methodology of materials to use the traditional elastic-plastic constitutive model (with Von Mises Isotropic Hardening criteria) is proposed. This is to achieve a better response in static computer simulations (CAE) for thermoplastic parts. This characterization strategy must be simple in application to facilitate regular use in industry.

In this methodology, the variables with an important role in the mechanical response are to be included (Curve parameters and FEM parameters) for their straight-forward implementation. It is important to comment on the Factor de Escala Master variable, which takes into account the reduction of material mechanical properties in the context of the standard injection process. This phenomenon has been previously researched, and the conclusions presented at the 16th International Congress on Project Engineering in 2012.

The validation of the methodology is performed using a hybrid test-simulation exercise. A flex test with torsional component on a door handle cover on a current automobile panel is selected. It highlights the correlation of experimental values versus the different FEM models implemented.

Keywords: *Characterization Methodology; F.E.M.; Elastoplastic analysis; Industrial feasibility*

VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA CUASI-ESTÁTICA SIMPLIFICADA DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS INYECTADOS EN PROCESO INDUSTRIAL PARA SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

Se establece una metodología de caracterización de materiales para alimentar el modelo constitutivo elastoplástico de Von Mises con endurecimiento isotrópico, para una mejor respuesta en simulaciones computacionales estáticas (CAE) de piezas fabricadas con termoplásticos. Esta estrategia de caracterización debe resultar simple en cuanto a aplicación, para facilitar el uso en el ejercicio habitual en industria.

En dicha metodología se contemplan todas aquellas variables que juegan un papel importante en la respuesta mecánica (variables Curva y variables MEF), seleccionadas por su implementación suficientemente simple. Se destaca la variable Factor de Escala Máster, que tiene en cuenta el descenso de propiedades mecánicas del material en un contexto de inyección usual en proceso industrial, fenómeno abordado previamente en la investigación presentada en el 16TH International Congress on Project Engineering, en 2012.

Se realiza la validación de la metodología mediante un ejercicio híbrido test-simulación. Se selecciona un ensayo de flexión acusada con cierta componente torsional, sobre una tapa de asidero de panel puerta de automóvil actual. Se lleva a cabo la correlación de los valores experimentales versus distintos modelos MEF implementados.

Palabras clave: *Metodología de caracterización; M.E.F.; Cálculo elastoplástico; Viabilidad industrial*

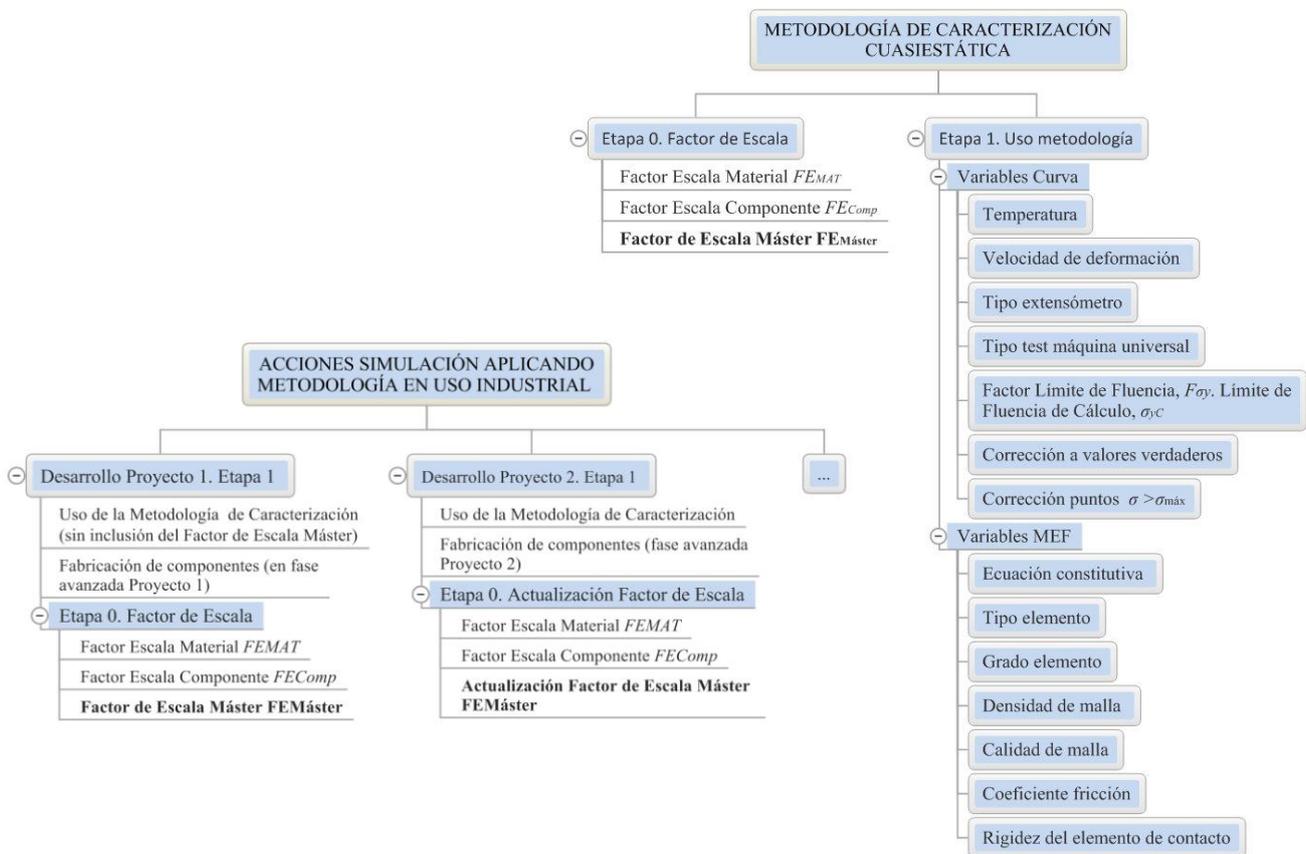
Correspondencia: Josep Maria Puigoriol Forcada. josep.puigoriol@iqs.edu

1. Metodología

El presente estudio parte de la propuesta de caracterización elastoplástica de materiales poliméricos para simulación estática presentada en el 2012 (Puigoriol & Reyes, 2012). Dicha propuesta se basa en la introducción de un valor genérico de escalado de las curvas elastoplásticas a temperatura ambiente, para contemplar la pérdida de propiedades mecánicas del material debido al proceso de inyección de los componentes en línea de producción. El estudio planteó la estimación del valor de escalado (factor de escala) para tres tipos de materiales correspondientes a dos familias (Polipropileno con refuerzo de Talco PPT, y ABS), en base a 3 componentes fuente para la extracción de probetas.

A lo largo de los años distintos autores han evaluado la sensibilidad de diversas variables para alimentar el modelo constitutivo frente a la respuesta obtenida en simulación estructural de materiales poliméricos (G. Dean & Wright, 2003; Schoßig et al., 2008; Şerban et al., 2013). Estas variables se pueden agrupar en dos clases: Variables Curva, que están relacionadas directamente con la obtención de la curva tensión-deformación o correcciones a implementar sobre ésta, y Variables MEF, parámetros relacionados con el modelo de elementos finitos. Para la presente metodología se ha tenido en cuenta los factores más relevantes, mostrados en la figura 1 (Etapa 1, Uso metodología). Con el fin de poder incluir el factor de escala en la metodología, es necesario contemplar una Etapa 0 previa, que debe prolongarse en el tiempo, a lo largo del desarrollo de los proyectos que realice una empresa que quiera implementar la presente metodología. Las acciones pueden resumirse en el siguiente diagrama.

Figura 1. Esquema implementación Metodología de Caracterización Cuasi-estática



Así pues, resulta importante definir de forma unívoca, para aplicar la etapa previa 0, el factor de Escala Máster para cada familia, a fin de realizar la corrección de las curvas debido al proceso de inyección.

1.1. Factor de Escala para un Material, FE_{Mat}

Para un componente seleccionado de un material de una familia, se dispondrá de 2 piezas y de cada pieza se realizará la extracción de muestras en 4 o 5 zonas, según posibilidades que ofrezca el diseño. A partir de la media de todos los datos obtenidos de las éstas dos piezas (curva media del componente) se realizará la comparativa del valor de la tensión máxima respecto al máximo de su curva ideal. Se establecerá como factor de reducción de un material FE_{Mat-i} , en %, el valor:

$$FE_{Mat-i}(\%) = \frac{\sigma_{\max, Ideal} - \sigma_{\max, Recort}}{\sigma_{\max, Ideal}} \cdot 100 \quad (1)$$

donde $\sigma_{\max, Ideal}$ es la tensión máxima de la curva de la probeta ideal y $\sigma_{\max, Recort}$ el valor extraído de la curva media del material (datos de probetas recortadas).

En el caso de disponer de más de un componente distinto fabricado con el mismo material, se establecerá el FE_{Mat-i} (%) como media de la reducción obtenida para cada componente j del mismo material, FE_{Comp-j} (%). Esta reducción por componente se realizará siguiendo la fórmula anterior. La media aritmética FE_{Mat-i} (%) resulta:

$$FE_{Mat-i}(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n FE_{Comp-j}(\%) \quad (2)$$

Finalmente, en el caso de disponer de un mismo componente fabricado con el mismo material en distintas inyecciones, se realizará la media del factor de escala de componente FE_{Comp-j} (%) teniendo en cuenta cada inyección $FE_{Comp-j, iny-k}$ (%):

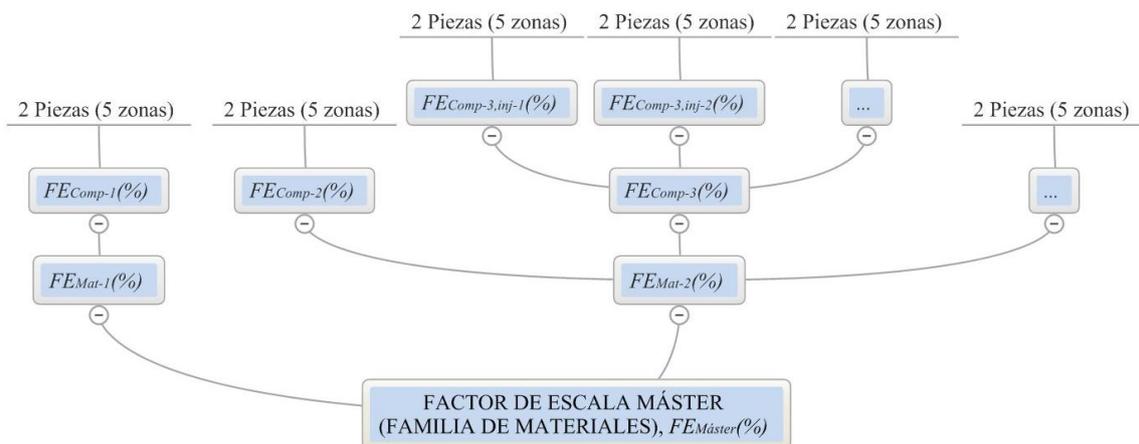
$$FE_{Comp-j}(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n FE_{Comp-j, iny-k}(\%) \quad (3)$$

Este valor se introduciría en la Ecuación 2 para realizar la media con los otros componentes.

1.2. Factor de Escala Máster, $FE_{Máster}$

Para una familia de materiales, se llevará a cabo el cálculo del factor de escala del material utilizando 2 o más componentes distintos.

Figura 2. Esquema Factor de Escala Máster



En el caso que se disponga de un número elevado de componentes de otros proyectos (en línea de producción), se realizará la selección teniendo en cuenta la elección de distintos materiales de la misma familia, de formas distintas de los componentes y con procesos de llenado de molde suficientemente diferentes.

Una vez obtenido el factor de escala por material, FE_{Mat-i} , se realizará la media hallándose el valor de reducción para la familia, en %:

$$FE_{Máster}(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n FE_{Mat-i}(\%) \quad (4)$$

2. Caso práctico: *Faurecia Interior Systems*

Se inicia el caso práctico de aplicación de la metodología sobre la empresa *Faurecia Interior Systems*, plataforma Abrera.

2.1. Selección de los Materiales y Componentes

Los materiales objeto de la estimación de los Factores de Escala Máster para las familias ABS y PPT son los siguientes, coherentes con la investigación anterior (Puigoriol & Reyes, 2012):

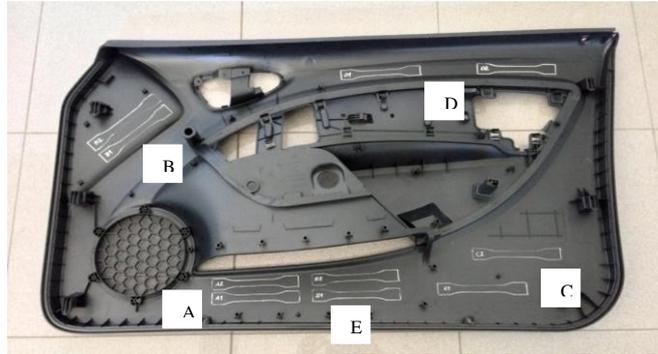
1. Polipropileno PP copolímero con un 16% de carga mineral de Talco (PPT16). Se han seleccionado dos materiales PPT16 distintos. A lo largo del estudio se hará referencia a ellos como PPT16a y PPT16b.
2. Polipropileno PP copolímero con un 30% de carga mineral de Talco (PPT30).
3. ABS (Acrlonitrilo Butadieno Estireno), copolímero con mayor respuesta mecánica que los Polipropilenos.

Para la obtención de las probetas ideales y recortadas de componente inyectado se ha procedido de igual manera que en el trabajo anterior (Puigoriol & Reyes, 2012), efectuando con detalle su trazabilidad. Para esta nueva fase de estudio se ha dispuesto de los siguientes componentes fuente, con distintas fechas de inyección:

Tabla 1. Componentes de estudio según familia de materiales

Familia	Componente	Año inyección / test	Material	Referencia
PPT	Cuerpo Consola	2004	PPT16a	CC 2004
PPT	Inserto	2008	PPT16b	INS 2008
PPT	Panel Delantero	2013	PPT16b	PD 2013
PPT	Panel Trasero	2013	PPT16b	PT 2013
PPT	Pieza Estructural	2004	PPT30	PE 2004
ABS	Inserto	2008	ABS	INS 2008
ABS	Inserto	2012	ABS	INS 2012
ABS	Armazón Asidero	2012	ABS	AA 2012

Figura 3. Mapa de extracción de las muestras para el componente Panel Delantero



2.2. Factores de Escala para la familia PPT y ABS, caso de estudio

Se realizan las medias de las curvas de componentes, con el fin de obtener el factor de escala por material, y así lograr finalmente el Factor de Escala Máster por familia, $FE_{Máster}(\%)$. Se presentan, mediante un esquema, los datos de componentes obtenidos y las acciones a realizar para la obtención de este parámetro.

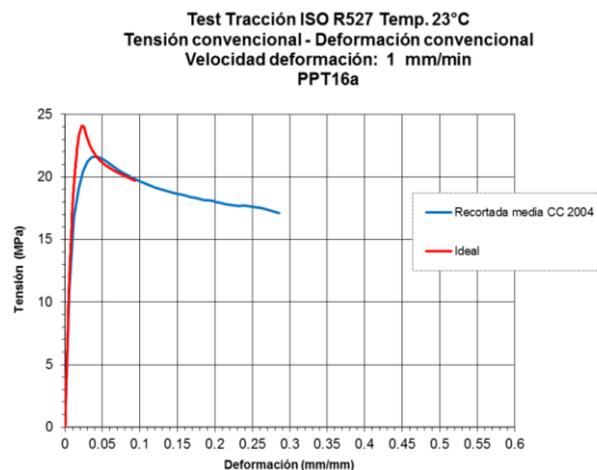
Figura 4. Cuadro de acciones sobre curvas recortadas. Cálculo $FE_{Máster,i}(\%)$

Material	PPT16a		PPT16b		PPT30
Componente	CC 2004	INS 2008	PD 2013	PT 2013	PE 2004
$FE_{Comp,j}(\%)$	$FE_{CC\ 2004}(\%)$	$FE_{INS\ 2008}(\%)$	$FE_{PD\ 2013}(\%)$	$FE_{PT\ 2013}(\%)$	$FE_{PE\ 2004}(\%)$
$FE_{Mat,i}(\%)$	$FE_{PPT16a}(\%)$		$FE_{PPT16b}(\%)$		$FE_{PPT30}(\%)$
$FE_{Máster}(\%)$	$FE_{Máster\ PPT}(\%)$				

Material	ABS		
Componente	INS 2008	INS 2012	AA 2012
$FE_{Comp,j\ iny-k}(\%)$	$FE_{INS\ 2008}(\%)$	$FE_{INS\ 2012}(\%)$	
$FE_{Comp,j}(\%)$	$FE_{INS}(\%)$		$FE_{AA\ 2012}(\%)$
$FE_{Mat,i}(\%)$	$FE_{ABS}(\%)$		
$FE_{Máster}(\%)$	$FE_{Máster\ ABS}(\%)$		

El valor del factor de escala de un componente se obtiene mediante comparativa de la tensión máxima de la curva media recortada versus la ideal (Ecuación 1), ambas de ingeniería. En la siguiente imagen puede observarse una de las comparativas.

Figura 5. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente CC 2004



La siguiente tabla resume los datos hallados para las dos familias, caso de estudio Faurecia Abrera:

Tabla 2. Factor de Escala Máster familias PPT y ABS

Familia	Referencia	Material	Temp (°C)	σ_{Max} Ideal (MPa)	σ_{Max} recort. media (MPa)	$\Delta\sigma_{Max}$ (MPa)	$FE_{Comp-j, iny-k}$ (%)	FE_{Comp-j} (%)	FE_{Mat-i} (%)	$FE_{Máster}$ (%)
PPT	CC 2004	PPT16a	23	24.1	21.6	-2.5	10	10	10	
	INS 2008				16.6	-2.5	13	13		
	PD 2013	PPT16b		19.1	15.3	-3.8	20	20	18	11
	PT 2013			14.9	-4.2	22	22			
	PE 2004	PPT30		21.2	20.1	-1.1	5	5		
	INS 2008			42.5	-3.3	7	13			
ABS	INS 2012	ABS	23	45.76	37.3	-8.5	19		17	17
	AA 2012				36.3	-9.5	21	21		

2.3. Etapa 1. Variables Curva y Variables MEF

Se fija la temperatura como la ambiente, entre 20 y 25°C. La velocidad de deformación utilizada en los ensayos se establece como baja (1 mm/min, 5 mm/min), representativas del comportamiento cuasi-estático. La obtención de la curva elastoplástica puede realizarse con un solo extensómetro: mecánico mediante contacto (clip), siendo suficientemente válido. Se selecciona el test a tracción, descartándose el de flexión a 3 o 4 puntos, por presentar una matriz distinta para cada fibra.

Por lo que se refiere a la determinación del Límite de Fluencia de Cálculo F_{σ_y} , se establece el F_{σ_y} (%) idéntico al Factor Máster $F_{Máster}$ (%), tal y como se presentó en la propuesta de caracterización del estudio anterior (Puigoriol & Reyes, 2012).

La corrección a valores verdaderos se realiza mediante la formulación clásica de Hencky (Dieter, 1986):

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (5)$$

$$\varepsilon_T = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6)$$

Se descarta la aplicación de la variación del coeficiente de Poisson al requerirse doble lectura de extensómetro.

La selección del modelo de corrección más allá del punto máximo se realizará llevando a cabo el test de sensibilidad del ejercicio híbrido test-simulación presentado en este estudio (tapa asidero). En concreto se evaluará el modelo de endurecimiento clásico (*Endurec1*) y el exponencial cuadrático (*Endurec2*) (Choung & Cho, 2008):

$$\sigma_T = \sigma_{max} \cdot e^{(\varepsilon_{T,eq} - \varepsilon_{max})} \quad (7)$$

$$\sigma_T = \sigma_{max} \cdot e^{(\varepsilon_{T,eq} - \varepsilon_{max})^2} \quad (8)$$

En ambos casos es necesario modificar las pendientes negativas, para aquellos puntos que sean necesarios.

En referencia a las variables MEF, se selecciona el modelo de Von Mises por ser el más ágil, descartándose tanto el modelo Drucker-Prager (Abaqus Inc., 2012; Raghava, Caddell, & Yeh, 1973) como el de cavitación (Dean & Crocker, 2006), que requieren de segundos ensayos para obtener los datos del material. Como regla de endurecimiento se selecciona el modelo isotrópico, adecuado para materiales plásticos, y la asociada como regla de flujo, por ser la implementada en los códigos numéricos para acompañar a los modelos constitutivos clásicos para metales. Las variables tipo de elemento, grado de elemento y calidad de malla se comentan en la descripción de los modelos FEM utilizados.

Con el fin de evaluar la sensibilidad del coeficiente de fricción, se realizarán tres simulaciones mediante el modelo estático de Coulomb con valores de 0.25, 0.35 y 0.5. Finalmente, se implementará el modelo de rigidez exponencial de Abaqus para su validación, con valores de $c_0=0.001$ mm y $p_0=1$ MPa (Abaqus Inc., 2008). Este modelo suele presentar buen comportamiento computacional.

3. Validación de la Metodología

3.1. Selección del dominio de estudio

La pieza de estudio corresponde al conjunto asidero de un panel puerta de un automóvil. Se selecciona el componente Tapa Asidero como dominio de estudio; pieza con perfil abierto de espesor constante de 2.5 mm. Su sección transversal es en forma de C. Esta pieza se obtiene por inyección de un material ABS.



3.2. Selección del tipo de ensayo

Se escoge la Tapa Asidero debido a su flexibilidad, siendo posible definir un ensayo de flexión que guarde cierta relación con el ensayo que recibe el conjunto cuando se encuentra ensamblado en la puerta. Es necesario evaluar el modelo constitutivo de Von Mises más allá del comportamiento axial puro, para contemplar el efecto de cavitación. Un ensayo de flexión-torsión presenta áreas donde las matrices tensión tienen carácter marcadamente compresivo, existiendo componentes de cizalladura debidos al mismo cortante de la flexión, y especialmente de la torsión. Un segundo motivo de elección es que la pieza presenta zonas para una buena definición de los puntos de fijación, para minimizar la influencia de la implementación de las constricciones en la correlación test-simulación.

3.3. Selección de las condiciones de ensayo. Caso de carga

El ensayo se lleva a cabo a temperatura ambiente y a baja velocidad (5 mm/min). Se impone un desplazamiento pre-escrito en y, sentido descendente, en la zona central de la tapa, zona de agarre del conjunto asidero. El valor de 15 mm de ensayo sobre la Tapa representa un valor doble o superior al que habitualmente presentan los conjuntos asideros diseñados en la industria del automóvil.

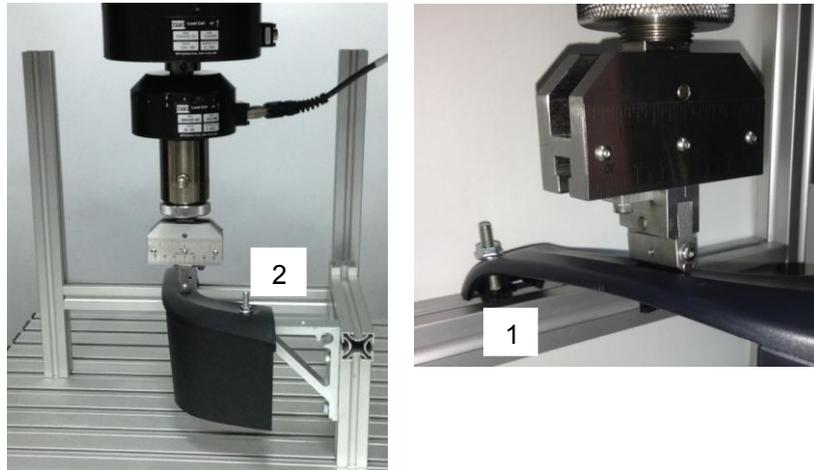
3.4. Descripción del criterio de validación

Se define el parámetro de validación como el valor de sollicitación que es necesario aplicar para lograr un nivel determinado de flecha en y.

3.5. Ensayo físico

El test físico se lleva a cabo con una máquina universal MTS Insight 100KN, con una célula de carga de 10 KN. Se establecen dos puntos de anclaje fijo, mediante tornillos. Se desea minimizar las zonas de contacto, donde es necesario contemplar el coeficiente de fricción para una mejor evaluación de la sensibilidad de esta variable fricción en el ejercicio.

Figuras 8 y 9. Pisador en posición para ensayo. Detalle de asentamiento sobre pieza

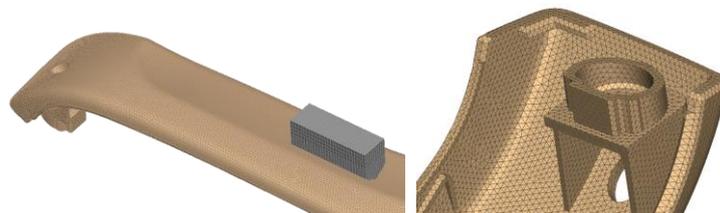


3.6. Modelo CAE con elementos tipo sólido (Tapa Sólidos)

3.6.1. Descripción del modelo

Este modelo respeta al máximo los detalles de la pieza, con tiempos computacionales más altos, maximizándose así, la bondad de la respuesta. Se han usado elementos tipo tetra4, C3D4 (Abaqus Inc., 2008), pirámide triangular de primer orden, por lo que el tamaño de arista se ha fijado en 1 mm. Se han garantizado 3 elementos a lo largo de los espesores principales. El número de elementos asciende a 920113, presentando alrededor de 600000 ecuaciones en el sistema numérico de resolución. Esto representa unas 2.5 horas de análisis para un procesador Intel Core 1.7GHz, con 4GB RAM, tiempo considerado como correcto para poder ejecutar análisis de sensibilidad. Se ha realizado un control de calidad de malla sobre el modelo, garantizando que los elementos que se encuentren fuera de los valores marcados por los ratios de calidad representen menos del 10% del total, y que estos elementos no se concentren en una determinada zona. Se ha exigido un valor del ratio Jacobiano superior a 0.2 (BETA CAE Systems S.A., 2009).

Figuras 10 y 11. Modelo Tapa Asidero, elementos sólidos. Detalles de malla



Se ha utilizado un dinamómetro de la marca SAUTER, modelo TVP-L para caracterizar las condiciones de contorno de la bancada de fijación de aluminio. Se han realizado 5 ensayos de carga vertical, para ambos puntos (fijación 1 y 2, ver figuras 8 y 9), obteniéndose unos valores de rigidez a flexión de $K_{FL1}=430$ N/mm y $K_{FL2}=105$ N/mm promedio de los valores leídos en los primeros 150N. Se han implementado elementos tipo muelle como constricciones de dominio. Para el indentador, se establecen elementos de contacto.

3.6.2. Modelización del material

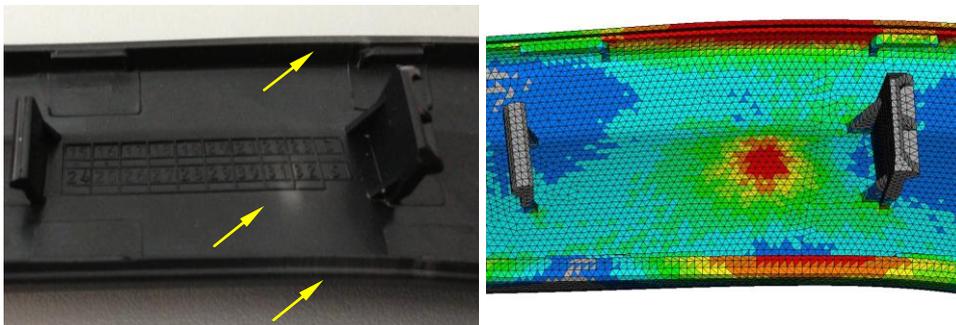
En todas las simulaciones realizadas para este ejercicio se utiliza el material ABS caracterizado según presente metodología. Se contemplan 3 curvas para evaluar la respuesta del modelo de endurecimiento más allá de la tensión máxima: Corrección a pendientes positivas (Pendientes Positivas), ley de endurecimiento Endurec1 y ley Endurec2.

3.6.3. Análisis realizados. Resultados modelos CAE Tapa Sólidos

Se han llevado a cabo los siguientes cálculos, a través de análisis no lineales implícitos con grandes desplazamientos:

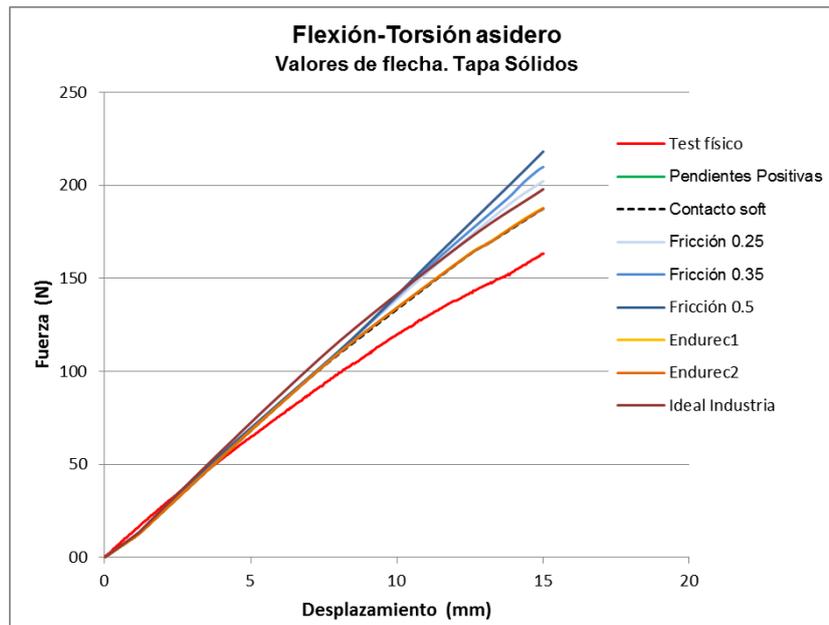
- Modelo sin ley de endurecimiento (Tapa Sólidos Pendientes Positivas)
- Modelo con endurecimiento según ley 1 (Tapa Solidos Endurec1)
- Modelo con endurecimiento según ley 2 (Tapa Solidos Endurec2)
- Modelo con ley de fricción de Coulomb de 0.25, con correcciones positivas (Tapa Sólidos Fricción 0.25)
- Modelo con ley de fricción de Coulomb de 0.35, con correcciones positivas (Tapa Sólidos Fricción 0.35)
- Modelo con ley de fricción de Coulomb de 0.5, con correcciones positivas (Tapa Sólidos Fricción 0.5)
- Modelo con contacto ley exponencial (Tapa Sólidos Soft)
- Modelo caracterización usual en industria (Tapa Sólidos Ideal Industria)

Figuras 12 y 13. Tensiones elementales de Von Mises, MPa. Tapa Sólidos Pendientes Positivas



Se agrupan las curvas solución en la siguiente figura. En el caso de las curvas correspondientes a la curva Contacto soft (---), ésta se encuentra superpuesta con la Pendientes Positivas (—). Respecto a las curvas con leyes de endurecimiento Endurec1 (—) y Endurec2 (—), se posicionan encima de la Pendientes Positivas (—), con valores ligeramente superiores.

Figura 14. Curva Fuerza-corrimiento en y, varios modelos, vs curva test físico



3.7. Modelo CAE con elementos tipo placa (Tapa Placas)

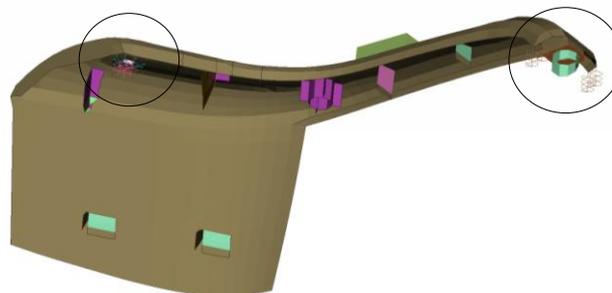
3.7.1. Descripción del modelo

La modelización mediante elementos tipo Shell optimiza al máximo los tiempos computacionales. Se ha implementado el modelo respetando los criterios de calidad de malla exigidos en industria para ejercicio habitual. El modelo queda definido por pocos elementos (1931), condicionados por el cumplimiento de los ratios de calidad de malla fijados por los constructores de vehículos (*aspect ratio, skewness, warping, taper, min. angle quads, max. angle quads, min. angle trias, max. angle trias*), y por la longitud de arista mínima de elemento, que gobierna el incremento de avance en el método explícito, para dinámica estructural. El número de ecuaciones es de 11886. El tipo de elemento utilizado es el placa tridimensional S4, de integración completa, aceptándose los elementos triangulares S3 degenerados (Abaqus Inc., 2008) mediante control de concentración.

3.7.2. Condiciones de contorno. Modelización del material

Se implementan las mismas constricciones (muelles caracterizados) que en el caso anterior.

Figura 15. Restricciones, modelo Tapa Placas



Para el indentador, se usan elementos de contacto, pero en este caso, es necesario especificar correctamente el cierre del elemento de contacto en la posición física real de la piel exterior de la Tapa. La superficie mallada corresponde a la superficie intermedia y no la

exterior de interacción. Por lo que se refiere al material, se ha usado la caracterización ideal de industria (con límite fluencia falseado a valores bajos (Puigoriol & Reyes, 2012)).

3.7.3. Análisis realizado. Resultados modelo CAE Tapa Placa

Se han llevado el cálculo correspondiente a:

- Modelo con elementos placas, representativo de industria, escala global (Tapa Placas)

Figura 16. Curva Fuerza-corrimiento en y, Tapa Placas vs curva test físico



3.8. Discusión de resultados

Para el caso de las bases de datos Tapa Sólidos, este tipo de modelo 3D presenta mayor rigidez que el comportamiento real del asidero, cuando se usa el modelo constitutivo de endurecimiento isotrópico de Von Mises.

En la metodología se introduce la selección de una ley de endurecimiento más allá de la tensión máxima, adecuada para cada material. Para el material ABS utilizado en este ejercicio híbrido test-simulación, la ley Endurec2 es la que presenta resultados mejores: desviación de la flecha en un 15% respecto al valor del test físico. Se selecciona el uso de la ley de Endurec2 para esta familia ABS. De la misma forma, para la familia de los PPT, se escoge la misma ley.

Por lo que se refiere a la fricción, el uso de un valor genérico de coeficiente provoca el aumento de rigidez del dominio de estudio, alejando la solución del valor del test físico (0.25 con un 24%, 0.35 con un 28% y 0.5 con un aproximadamente 37%). En el caso de simulaciones estructurales cuasi-estáticas, este coeficiente combinado con un modelo 3D no resulta interesante, pues no se han detectado mejoras en resultados, en convergencia o en tiempos computacionales. Este hecho no es extrapolable a otras situaciones estructurales, donde un coeficiente de fricción puede estabilizar (o desestabilizar) una problemática en dinámica, por ejemplo. En consecuencia, este parámetro no se introduce en la metodología para simulación cuasi-estática.

La implementación de la ley exponencial en los elementos de contacto no ha mejorado la convergencia, penalizando ligeramente el tiempo computacional. Esto es debido a que la definición del modelo utilizado con elementos sólidos es muy buena, por lo que los elementos de contacto no han presentado ningún problema a lo largo de los análisis a nivel local. Sin embargo, en otras situaciones, el uso de esta ley puede ser beneficioso, en

relación a este resultado, no se introduce como regla fija de uso en la metodología, dejando su posibilidad de utilización en aquellos casos de problemáticas computacionales.

Finalmente, para la caracterización ideal que se utiliza en la industria, se obtiene un valor de sollicitación aún mayor que el obtenido mediante la presente metodología (Tapa Sólidos Endurec2).

En referencia a la distribución de tensiones, comentar que el modelo Tapa Sólidos Ideal Industria presenta localmente una distribución de deformaciones plásticas más extendida, fruto del error cometido cuando se falsea el límite para seguir el trazo de la curva.

El Modelo Tapa Placas presenta menor rigidez que el test físico, por lo que imponiendo el valor de 15 mm como deformación vertical, la fuerza necesaria es significativamente inferior a los 163N del test.

En comparación con el modelo Tapa Sólidos Endurec2, la desviación respecto al valor objetivo (test físico) es equivalente, pero por debajo (-15% de flecha). Sin embargo, es importante remarcar que la obtención de este valor no es tan desfavorable debido a que los errores motivados por la modelización de placa se contrarrestan con los que se obtienen debido al uso del modelo constitutivo de Von Mises.

Finalmente notar el tiempo consumido, 24 segundos, versus la hora y 45 minutos aproximadamente para los modelos con elementos sólidos.

4. Conclusiones

Se ha definido una metodología de caracterización elastoplástica cuasi-estática para materiales termoplásticos, teniendo en cuenta el equilibrio bondad/coste en el ejercicio diario industrial. Se han contemplado las Variables Curva y las Variables MEF a implementar en dicha metodología, definiéndose en detalle la variable Factor de Escala Máster para una familia de materiales. Se ha establecido la estrategia de implementación de la metodología que debe seguir una empresa que desee introducirla en su departamento de simulación.

La correlación (ensayo híbrido) realizada para el componente Tapa Asidero, en base al caso práctico llevado a cabo con los datos y material suministrados por *Faurecia Interior Systems Abrera*, muestra un comportamiento del modelo CAE con la metodología implementada (elementos sólidos) más rígido que el test físico. Sin embargo, presenta mejor ajuste en la respuesta que el modelo CAE con la estrategia de caracterización actual extendida en industria (elementos sólidos). Para el modelo CAE implementado con elementos tipo placa (tipo de modelización muy habitual en grandes ensamblajes), la fuerza necesaria para obtener los 15 mm de flecha es menor que la del test físico. No obstante cabe remarcar que, en este caso, los errores debidos a la modelización con este tipo de elementos se contrarrestan en parte con los obtenidos debido al uso del modelo constitutivo de Von Mises.

Como fruto del caso práctico *Faurecia*, se ha determinado la disminución de propiedades de cuatro materiales a partir de muestras recortadas de 10 componentes. Se deduce el Factor de escala Máster del 11% para la familia PPT, y del 17% para la del ABS. Del mismo ejercicio de correlación se selecciona como ley de endurecimiento para la familia ABS y PPT la *Endurec 2*, correspondiente a la ecuación con factor exponencial cuadrático, por presentar la mejor respuesta versus test físico. Se descarta la introducción de un coeficiente de fricción para este tipo de simulación cuasi-estática. De forma optativa puede contemplarse el uso de la ley exponencial para la variable Rigidez del elemento de contacto, en aquellos casos de problemáticas computacionales.

Mediante la metodología se consigue una mejora en la bondad de los resultados versus la estrategia actual extendida en la industria. Esta metodología resulta, a su vez, simple en su implementación, y ajustada en cuanto a tiempos computacionales se refiere.

5. Bibliografía

- Abaqus, Inc. (2008). *ABAQUS Analysis User's Manual, release 6.8. Volumen IV: Elements*. USA: Abaqus Inc.
- Abaqus, Inc. (2008). *ABAQUS Analysis User's Manual, release 6.8. Volumen V: Prescribed Conditions*. USA: Abaqus, Inc.
- Abaqus, Inc. (2012). *Abaqus Theory Manual*. USA: Abaqus, Inc.
- BETA CAE Systems S.A. (2009). *ANSA v.13.0.2 User's Guide*. Greece: BETA CAE Systems S.A.
- Choung, J. M., & Cho, S. R. (2008). Study on true stress correction from tensile tests. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(6), 1039–1051.
- Dean, G. D., & Crocker, L. E. (2006). Prediction of the impact performance of plastics using finite element methods. Teddington: NPL Report, Measurement Good Practice Guide No. 87. Disponible en: <http://www.npl.co.uk/publications/prediction-of-the-impact-performance-of-plastics-using-finite-element-methods>.
- Dean, G., & Wright, L. (2003). An evaluation of the use of finite element analysis for predicting the deformation of plastics under impact loading. *Polymer Testing*, 22(6), 625–631.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy* (3rd. Edit.). New-York: McGraw-Hill Book Company.
- Puigoriol, J. M., & Reyes, G. (2012). Una caracterización elastoplástica de materiales poliméricos inyectados en proceso industrial para simulación estática estructural. En AEIPRO (Ed.), *Proceedings from the 16th International Congress on Project Engineering (Valencia, July 2012)* (pp. 2210–2222). Valencia: AEIPRO
- Raghava, R., Caddell, R. M., & Yeh, G. S. Y. (1973). The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science*, 8(2), 225–232.
- Schoßig, M., Bierögel, C., Grellmann, W., & Mecklenburg, T. (2008). Mechanical behavior of glass-fiber reinforced thermoplastic materials under high strain rates. *Polymer Testing*, 27(7), 893–900.
- Şerban, D. A., Weber, G., Marşavina, L., Silberschmidt, V. V., & Hufenbach, W. (2013). Tensile properties of semi-crystalline thermoplastic polymers: Effects of temperature and strain rates. *Polymer Testing*, 32(2), 413–425.